

**Biorremediación como alternativa a los tratamientos convencionales,
para degradar aceites contaminados con Bifenilos Policlorados
(PCB), en Colombia.**

Presentado por:

Constanza Andrea Isaza Maya, Carolina Londoño Tobón

Revisado por:

Claudia Lucía Zuluaga Echeverry

Monografía presentada para optar por el título de Especialista en Gestión
Ambiental.

Universidad de Antioquia

Medellín

2018

Tabla de Contenido

1. Introducción	4
1.1 Antecedentes	4
1.2 Descripción	5
1.3 Formulación	6
2. Objetivos	7
2.1 Objetivo general	7
2.2 Objetivos específicos	7
3. Metodología	8
4. Marco Teórico	9
4.1 Bifenilos Policlorados	9
4.2 Marco normativo	11
4.3 Tratamientos biológicos	14
5. Estado del Arte	15
5.1 Metodologías convencionales para la eliminación de PCB	16
5.2 Avances en Colombia	17
5.3 Biorremediación como alternativa biológica para la eliminación de PCB	18
5.3.1 Decloración reductiva anaeróbica	18
5.3.2 Degradación aeróbica	19
5.3.3 Tratamiento secuencial anaeróbico-aeróbico	20
5.4 Variables dependientes para el proceso de biodegradación	22
6. Análisis	25
7. Conclusiones	33
8. Referencias bibliográficas	35

Lista de Tablas

Tabla 1. Métodos convencionales de descontaminación y eliminación de PCB	16
Tabla 2. Metas y fechas de cumplimiento para propietarios de equipos contaminados	26

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Diseño Metodológico	8
------------------------------------	---

Biorremediación como alternativa a los tratamientos convencionales, para degradar aceites contaminados con Bifenilos Policlorados (PCB), en Colombia.

Resumen:

La preocupación por la disposición final de los aceites de transformadores contaminados con PCB ha aumentado en los últimos años. Por tanto, existe una necesidad de investigar y mejorar los métodos de tratamiento existentes con el fin de minimizar los efectos secundarios de los PCB en el ambiente. Esta revisión bibliográfica se realizó con el objetivo de analizar las metodologías de biorremediación para degradar aceites contaminados con PCB y verificar su potencial aplicación en Colombia. Los estudios demuestran que los procesos metabólicos para degradación de PCB mediados biológicamente son: la dechloración reductiva anaeróbica, la degradación aeróbica y el tratamiento secuencial anaeróbico-aeróbico. Este último resultó ser el sistema biológico más eficiente para la degradación de PCB, debido a que los congéneres altamente clorados se biodegradan a través del proceso anaeróbico, dando como resultado congéneres menos clorados, y estos a su vez son el sustrato para la degradación aeróbica; logrando así la mineralización completa de PCB. Sin embargo, las tasas de biodegradación dependen de variables específicas como: concentración del PCB, tiempo de contaminación, estructura del PCB, cantidad de átomos de Cloro, tipo de microorganismos empleados y su interacción, pH y temperatura. Para el caso Colombiano, en el que se pretende realizar una eliminación controlada de los aceites contaminados con PCB (contenidos en sistemas cerrados), se puede presentar esta metodología como una alternativa razonable ya que permite controlar variables críticas que afecten a la población de microorganismos. Adicionalmente, es una metodología rentable y ecológica con el medio ambiente.

Palabras clave: Polychlorinated Biphenyls (PCB), Biological treatment of PCB, Bioremediation, Biotransformation, Transformer oil, Aerobic-anaerobic biodegradation, Dechlorination, Oxidative degradation.

1. Introducción

Los bifenilos policlorados (PCB) son moléculas sintéticas, constituidas por dos anillos de benceno unidos por un enlace carbono-carbono, estas moléculas pueden formar diferentes especies de acuerdo con el número de átomos de cloro que le constituyan, teniendo en cuenta que en esta estructura sólo es posible sustituir un máximo de 10 átomos de hidrógeno por la misma cantidad del elemento anteriormente mencionado. Por sus características fisicoquímicas los PCB se consideraron, de acuerdo al Convenio de Estocolmo, como compuestos orgánicos persistentes POPs “*Persistent Organic Pollutants*” por su sigla en inglés, (CNRCOP, (2018)), debido a que tienen una alta resistencia a la degradación ambiental, además de las consecuencias desfavorables que pueden causar para el hombre y el ambiente, dada su capacidad de bioacumulación causando efectos tóxicos, carcinogénicos y de reproducción (Bogdal et al., 2017).

En la actualidad, existen grandes cantidades de aceites de transformadores al final de su vida útil en todo el mundo, cuya liberación real o potencial al medio ambiente amenaza seriamente a los seres humanos y al ecosistema. Por lo tanto, es urgente desarrollar y mejorar métodos de tratamiento para este tipo de aceites con el fin de minimizar sus efectos negativos.

Dado que las bacterias cumplen un papel fundamental en la degradación de compuestos químicos de desecho, con la presente monografía se pretende investigar metodologías biológicas de degradación de PCB, como alternativa a los tratamientos convencionales, con el objetivo de proponer una solución ecológica para Colombia.

1.1 Antecedentes

Los Bifenilos Policlorados (PCB) son sustancias que se encuentran clasificadas dentro del grupo de Contaminantes Orgánicos Persistentes. Estas sustancias fueron sujeto de estudio en el año 1995 a petición del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente, por ser un peligro representativo para el hombre y el medio que habita (PNUMA) (Stockholm, Convention, (2018)). Al encontrarse la importancia toxicológica de los PCB en el año 2001 se realiza el

Convenio de Estocolmo, en donde se fijan políticas para su manejo y destrucción, lo cual ha promovido la investigación en aras de encontrar la mejor disposición a dichos residuos.

A la fecha se tienen varias propuestas, sin embargo, se han materializado principalmente las que está ofertando el sector privado. A nivel mundial se encuentran actores privados como Tredi y Sea Marconi en Francia e Italia respectivamente; ellos destacan procesos de eliminación como la deshalogenación, combustión controlada y descontaminación de equipos por medio de adición de aceites dieléctricos no contaminados. Por otra parte en Argentina se está llevando a cabo la separación de los PCB por medio de una tecnología desarrollada utilizando bentonitas, mientras que en Colombia, la Empresa de Servicios Públicos EPM, cuenta con su propia planta de eliminación de PCB, esta a su vez tiene la licencia ambiental correspondiente y allí según lo reportado en la página oficial (“Gestión de PCB en Colombia, un compromiso con el medio ambiente - Portal de Clientes Corporativos,” 2018) se está realizando la descontaminación de sus transformadores y se evalúa la posibilidad de prestar este servicio a otras entidades; sin embargo, no se expone la metodología que se lleva a cabo. De acuerdo con un informe realizado por EPM al 2014, se estaba realizando la cuantificación de los PCB mediante cromatografía de gases y posteriormente se exportaba el material contaminado a las plantas de incineración de Tredi, en Francia (Gestión de PCB, 2014.).

Los métodos que son ofrecidos comercialmente en el mundo para la eliminación de PCB, son de carácter físico, químico o una mezcla de ambas. En Colombia no se cuenta con la infraestructura necesaria para disposición final de PCB. Sin embargo, se propone la investigación de metodologías biológicas, como alternativa a los tratamientos convencionales, buscando ser una opción responsable con el medio ambiente y rentable económicamente.

1.2 Descripción

Basados en los criterios planteados por el Convenio de Estocolmo, donde se menciona el carácter tóxico de los bifenilos policlorados (Convenio de Estocolmo (2011)) y teniendo en cuenta los avances en las metodologías mencionadas anteriormente para la eliminación de éstos, se plantean las siguientes preguntas:

- ¿Cómo es el tratamiento que se le da a los Bifenilos Policlorados (PCB) en Colombia respecto a otros países?
- ¿Las técnicas de biorremediación pueden presentar una alternativa ecológica para la degradación de PCB en Colombia?
- ¿La biorremediación es la metodología más adecuada para degradar aceites contaminados con PCB?
- ¿Qué implicaciones puede tener la biorremediación de aceites contaminados con PCB?

A partir de estas preguntas se delimitará el problema y se establecerá el punto de partida para el desarrollo de la investigación.

1.3 Formulación

Los bifenilos policlorados (PCB) al ser sustancias de origen sintético tienen un amplio uso en la industria de pinturas, tintas y como aceite en diversos equipos, debido a sus características fisicoquímicas que favorecen un correcto funcionamiento. Pese a sus extensas aplicaciones, se encontró que estos isómeros policlorados son altamente dañinos para el hombre y el medio ambiente (Hung, Katsoyiannis, & Guardans, 2016). Tras el conocimiento de esto, varios países, incluido Colombia, se comprometieron con la eliminación de los PCB, mediante el Convenio de Estocolmo. De allí se ha derivado el levantamiento del inventario de los mismos en el territorio nacional y se plantean una serie de protocolos para su manejo, almacenamiento y posterior destrucción (Stockholm, Convention, (2018)), utilizando métodos principalmente de dilución y sustitución de aceites contaminantes (Tredi (2018)).

Actualmente en Colombia, se encuentran en pruebas piloto las siguientes metodologías: declorinación y oxidación de agua bajo condiciones críticas; y en pruebas de laboratorio se encuentra la biorremediación. Por su parte, los tratamientos térmicos dejan consigo un gasto energético muy elevado, compuestos gaseosos tóxicos o pueden dejar algunas moléculas termorresistentes que presentan riesgo para el hombre o el medio ambiente, por lo cual es considerable pensar en la síntesis de moléculas amigables partiendo de los PCB. (Richards &

Agranovski, 2017).

La preocupación por la pronta y adecuada eliminación de estos contaminantes ha atraído el interés de muchos investigadores a nivel mundial, estos han planteado diversas alternativas para la disposición de los PCB, incluida la biorremediación. Por tanto, es posible considerar esta metodología como una alternativa ecológica para Colombia.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar metodologías de biorremediación para degradar aceites contaminados con PCB y su potencial aplicación en Colombia.

2.2 Objetivos específicos

- Identificar las metodologías de biorremediación susceptibles de aplicar en aceites contaminados con PCB.
- Verificar la viabilidad de técnicas de biorremediación para degradar aceites contaminados con PCB en Colombia.
- Proponer una alternativa ambientalmente responsable para el tratamiento de PCB en Colombia.

3. Metodología

La presente monografía tiene su principal enfoque en la revisión bibliográfica de metodologías de biorremediación, con el objetivo de responder a la problemática planteada para la degradación de aceites contaminados con PCB. Para el desarrollo de este estudio se establecieron cuatro fases principales: Planteamiento del problema, Ejecución, Investigación, Análisis y Conclusiones. A continuación se describe en detalle cada etapa:

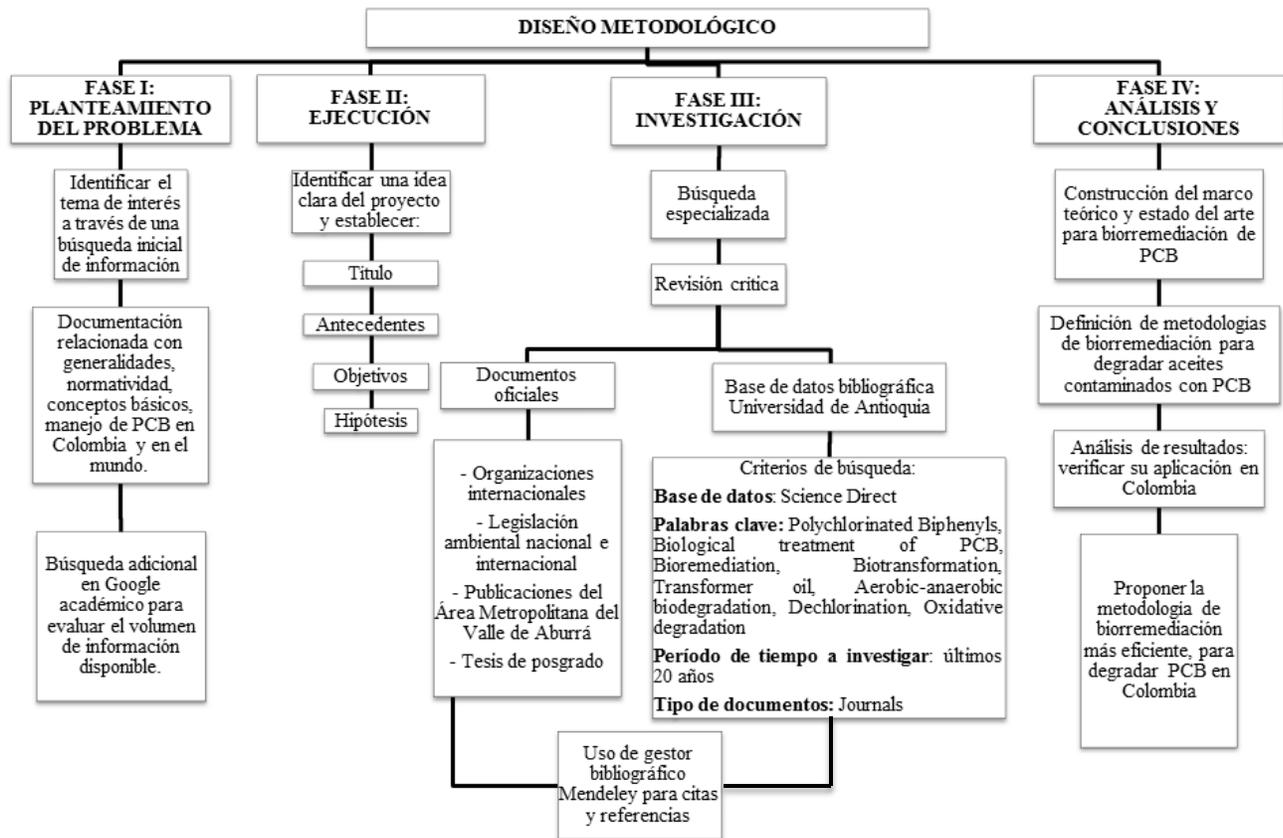


Ilustración 1. Diseño metodológico

4. Marco Teórico

4.1 Bifenilos Policlorados

Son compuestos sintéticos cuya fórmula química es $C_{12}H_{10-x}Cl_x$, donde x representa el número de átomos de cloro. La familia de los PCB está constituida por 209 isómeros, compuestos individuales reconocidos que se clasifican como homólogos, congéneres y mezclas. Los homólogos se refieren al nombre general de un PCB dependiendo del número de átomos de cloro que posea. Los nombres de los congéneres indican la posición de cada cloro dentro de la molécula y las mezclas se refieren a combinaciones de varios bifenilos con diferente grado de cloración y dan como resultado fluidos comerciales. (Ahlborg, Hanberg, & Kenne, 1992). (EPA, 2013)

Los PCB fueron sintetizados por primera vez en el año 1881 por los científicos Schmitt & Schulz en Alemania. Durante el año 1979 fueron manufacturados industrialmente para su uso comercial por la empresa Monsanto (EPA, 2013). Su resistencia al fuego, reducida conductividad eléctrica, gran capacidad de aislamiento, baja volatilidad a condiciones normales de presión y temperatura, insolubilidad en agua, estabilidad química, no inflamabilidad y punto de ebullición a alta temperatura, son características industriales y de consumo que los popularizaron en el sector de generación y transmisión de energía eléctrica, siendo utilizados ampliamente en transformadores, condensadores, fluidos para transferencia de calor y movimiento en sistemas hidráulicos y también en la fabricación de pinturas, recubrimientos, plásticos entre otros.

Los PCB se pueden clasificar en sistemas cerrados, parcialmente cerrados o abiertos, de acuerdo con la aplicación y facilidad para ser liberados o escapar al ambiente. Una aplicación cerrada es aquella en la cual el fluido se encuentra completamente contenido dentro de unidades o equipos sellados como condensadores, reguladores o transformadores, lo que reduce la probabilidad de ser liberados, excepto bajo circunstancias extremas tales como fugas accidentales, derrames o incendios. En aplicaciones parcialmente cerradas se reconoce que en algún momento de la operación el PCB entrará en contacto con el ambiente; y los sistemas abiertos implica que la sustancia tiene contacto directo con el ambiente natural o el organismo, y

por tanto puede movilizarse fácilmente en distintas matrices ambientales (aire, agua, suelo y biota) (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2015).

Debido a la presencia de cloro, estas sustancias se configuran en compuestos muy estables y resistentes a la degradación química, biológica, mecánica y térmica. Se caracterizan por tener una baja presión de vapor y elevados puntos de inflamación, no son hidrolizables ni solubles en agua, pero sí en solventes orgánicos, aceites y grasas vegetales o sintéticas; características por las cuales son clasificados como Compuestos Orgánicos Persistentes (POPs). (CNRCOP, 2014).

El incremento en la concentración de los PCB en el ambiente es uno de los principales efectos adversos que produce su enorme persistencia, de tal forma que mantienen el crecimiento de la concentración ambiental, incluso en los casos en que la liberación al ambiente haya cesado. Esto se debe a que no se alcanza el equilibrio entre la tasa de liberación y la remoción del contaminante o que éste no puede ser degradado hasta alcanzar su concentración ambiental natural.

Estas concentraciones en los sistemas naturales y organismos vivos se logran a través de tres fenómenos: bioacumulación, bioconcentración y biomagnificación. El primer término se refiere a la acumulación de sustancias químicas en organismos vivos de forma que estos alcanzan concentraciones más elevadas que las del medio ambiente o los alimentos, a partir de la ingesta, distribución, metabolismo y eliminación del contaminante (CONAMA & PNUMA, 2004). El segundo término se presenta cuando una vez alcanzada una condición de equilibrio, la concentración de un contaminante se incrementa progresivamente como consecuencia del cambio en la relación de absorción y eliminación de un organismo. Si además de los procesos anteriores, se presenta un incremento en la concentración del contaminante en un organismo a través de la cadena trófica, el fenómeno se denomina biomagnificación; el cual puede comprometer varios eslabones de la cadena alimenticia y múltiples organismos.

De esta manera, estos fenómenos conllevan a que una cantidad determinada de PCB, liberada al ambiente de manera accidental o intencional, se acumule y magnifique a través de la cadena trófica; siendo los seres humanos el último eslabón, quienes estarían alcanzando la máxima

concentración de este compuesto orgánico persistente al ingerir alimentos provenientes de un medio contaminado.

La liberación accidental o deliberada de un PCB se considera peligrosa por la toxicidad de este tipo de POPs, la cual depende de la concentración del contaminante en el medio, la vía y la ruta de exposición con el organismo, la dosis recibida y la frecuencia de exposición (LaGreca, Buckingham, & Evans, 1996). Existen tres rutas de exposición a través de las cuales los PCB pueden ingresar al organismo: por inhalación, ingestión y absorción.

Una vez que estos compuestos ingresan al organismo vivo (humano o animal), difícilmente son hidrolizados y, por tanto no son expulsados en la orina, heces o sudor; por el contrario, se acumulan en el organismo, alojándose principalmente en tejido graso. De tal manera que los efectos en la salud se presentan principalmente en el mediano o largo plazo, con las siguientes afecciones crónicas: irritación de los ojos, hipersecreción de las glándulas lagrimales y conjuntivitis, daños hepáticos, anemia, efectos reproductivos, irritaciones cutáneas, cloracné y daños al sistema nervioso. Por su parte, los bebés gestados por una madre intoxicada tienden a tener bajo peso al nacer y mostrar anomalías óseas (CONAMA & PNUMA, 2004).

Es importante resaltar que los mayores riesgos los asumen las personas con mayor grado de exposición que trabajan en los sectores productivos, usuarios de mantenimiento de equipos eléctricos, así como en las etapas de limpieza, tratamiento y eliminación de PCB. La introducción de estos compuestos en los sistemas naturales representa un peligro directo para los organismos individuales y sus funciones ecológicas como especie. Por tanto, es imperativo regular a través de acuerdos, las medidas que se deben ejecutar para el manejo de los PCB.

4.2 Marco normativo

El marco normativo más importante para la gestión de PCB, es el *Convenio de Estocolmo sobre Compuestos Orgánicos Persistentes (SC)*, el cual se celebró en el año 2001 como una conferencia de plenipotenciarios en Estocolmo (Suecia), y del cual Colombia hace parte desde el

año 2002. El objetivo de este Acuerdo Ambiental Multilateral es proteger la salud humana y el medioambiente frente a las sustancias persistentes, como los PCB.

En el convenio se pueden detallar varios apartados que permiten, por ejemplo, mediante una secuencia de instrucciones, clasificar un producto químico como POPs mediante parámetros tales como, persistencia, bioacumulación, efectos adversos, entre otros. Además, se establecen unos lineamientos para la reducción y eliminación de algunos POPs que para la versión inicial del documento eran únicamente 12 sustancias (CNRCOP, (2018)) pero para la actualidad ya alcanza las 21 (Scheringer et al., 2012). Es importante resaltar que los países participantes en el SC tienen prohibida la fabricación, reuso y exportación (a menos de que sea con fines de eliminación por medio de tecnologías adecuadas) de PCB. (Convenio de Estocolmo (2011)).

En el documento se dedica un segmento a los PCB, además, quedan literalmente indicados los periodos de evaluación del trabajo realizado por cada nación, puntualmente para los PCB corresponde a periodos de 5 años. (CNRCOP, (2018)). Los acuerdos esbozan una serie de compromisos que acarrearán una gran responsabilidad para los países firmantes, quienes acogidos a las directrices del mismo, procuran dar el cumplimiento a cabalidad de las tareas pactadas; pese a esto la efectividad de las medidas del SC son discutidas por autores como (Hung et al., 2016) que afirman que la disminución de PCB en las últimas décadas es muy lenta o nula, mientras que (Bogdal et al., 2017) plantean que existen unos programas de monitoreo donde se evidencia una tendencia general al decrecimiento, en fuentes como aire, biota y humanos, aun así manifiesta como las fuentes difusas son aquellas que aún siguen siendo un problema.

En Colombia, como parte de los compromisos que se adquirieron con la firma del SC, a través del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, se formuló y publicó en el año 2010 el *Plan Nacional de Aplicación del Convenio de Estocolmo*, dentro del cual se encuentra el *Plan Nacional de Acción para los PCB*, que tiene como objetivo identificar y gestionar los PCB en Colombia, así como reducir y eliminar gradualmente los efectos de su manejo inadecuado. Los objetivos que se plantearon para el cumplimiento de esta meta son:

- Identificar las existencias de equipos, aceites, desechos y materiales contaminados con PCB (inventarios).
 - Minimizar los riesgos derivados del uso, almacenamiento, manipulación, transporte, tratamiento y eliminación de equipos, aceites, desechos y suelos contaminados con PCB
 - Eliminar los equipos, aceites y desechos contaminados con PCB de forma ambientalmente segura y remediar los suelos contaminados con estas sustancias.
- (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia, 2015)

A la fecha se están ejecutando los inventarios de PCB, los cuales son bases de datos que permiten identificar la cantidad de materiales o equipos que se encuentran contaminados (Stockholm, Convention. (2011)). Como se cita en el SC en los Artículos 5 y 11, se deben realizar inventarios como medida para poder “reducir o eliminar las liberaciones derivadas de la producción no intencional” y “para desarrollar investigación, desarrollo y vigilancia”. Sin embargo, dicho inventario está planteado para los sistemas cerrados inicialmente, ya que el paso siguiente es eliminar el contaminante, pero es preciso que se tenga en cuenta que también se están realizando inventarios de los contaminantes en sistemas abiertos y esto aumenta su complejidad ya que por diversos modelos de transporte se han encontrado en lugares muy alejados de las zonas de fabricación y uso (Magulova, K. (2012)).

Actualmente en Colombia, el proceso de identificación y eliminación de sistemas cerrados contaminados con PCB se encuentra en la fase de inventarios y al no contar con la tecnología necesaria para la eliminación en el territorio nacional, se está realizando una tercerización de este proceso con Francia e Italia principalmente. Durante la exportación aumentan los riesgos relacionados con derrame accidental en el embalaje y transporte, ocasionando daños significativos al ambiente y al hombre. Por tal motivo se propone investigar la metodología de biorremediación como alternativa para degradar los aceites contaminados con PCB y verificar su posible aplicación en Colombia, con el fin de contribuir a la disminución del riesgo ecológico.

4.3 Tratamientos biológicos

La biorremediación se define como la aplicación de microorganismos o las enzimas derivadas de ellos, para la restauración del ambiente. Esta tecnología actúa a través de las intervenciones de la diversidad biológica para los propósitos de mitigación (y siempre que sea posible, la eliminación) de los efectos nocivos causados por los contaminantes ambientales en un sitio dado. Esta metodología se centra en la remediación biológica, basada esencialmente en la capacidad de los organismos vivos para degradar en forma natural ciertos compuestos contaminantes; los sistemas biológicos frecuentemente utilizados son microorganismos o vegetales (Garzón, Rodríguez Miranda, & Hernández Gómez, 2017).

Los microorganismos pueden modificar los contaminantes orgánicos como los PCB de tal forma que se minimicen los efectos negativos. Estos participan en la biodegradación produciendo enzimas, que modifican el contaminante orgánico en compuestos más simples. La biodegradación se da de dos formas, mineralización y cometabolismo (Dobbins, 1995) (McEldowney, Hardman, & Wait, 1993). En la mineralización, los organismos competentes utilizan el contaminante orgánico como fuente de carbono y energía, lo que resulta en la reducción del contaminante a sus elementos constituyentes. El cometabolismo, por otro lado, requiere una segunda sustancia como fuente de carbono y energía para los microorganismos, pero al mismo tiempo se transforma el contaminante objetivo. Si los productos del cometabolismo son susceptibles de una mayor degradación, pueden ser mineralizados, de lo contrario se produce una degradación incompleta.

La efectividad de la biodegradación depende de muchos factores ambientales, tales como la estructura del compuesto, la presencia de sustituyentes y su posición en la molécula, la solubilidad del compuesto y la concentración del contaminante. Por tanto los microorganismos tendrán un mayor gasto energético a medida que la moléculas tengan una estructura más compleja y/o aumente la concentración de PCB (Dobbins, 1995).

La concentración de contaminantes también es un factor importante que afecta la biodegradación. En general, una baja concentración de contaminantes puede ser insuficiente para

la inducción de enzimas degradantes o para mantener el crecimiento de organismos competentes. Otros factores ambientales que afectan la degradación son la temperatura, el pH, la presencia de sustancias tóxicas o inhibidoras y sustratos competidores, la disponibilidad de aceptores de electrones adecuados y las interacciones entre microorganismos. Todos estos factores interactúan y hacen que las velocidades de biodegradación sean impredecibles.

El uso de microorganismos, tanto anaeróbicos como aeróbicos, son un proceso conocido para degradación de PCB. Las bacterias anaerobias poseen características que se adaptan bien a los contaminantes con una alta concentración de carbono, debido a la limitación del oxígeno en los sistemas de alta concentración (Dobbins, 1995). El ambiente de los anaerobios es propicio para las transformaciones reductoras donde el cloro es desplazado por el hidrógeno (McEldowney, Hardman, & Wait, 1993). El compuesto de cloro es adecuado para el ataque oxidativo de las bacterias aeróbicas. Las bacterias aerobias crecen más rápido que las anaerobias y pueden mantener altas tasas de degradación que dan como resultado la mineralización del compuesto. Teóricamente, la degradación biológica de los PCB debería dar como resultado la administración de CO₂, cloro y agua. Este proceso implica la eliminación de cloro del anillo de bifenilo seguido de escisión y oxidación del compuesto resultante (Boyle, Silvin, Hassett, Nakas, & Tanenbaum, 1992).

5. Estado del Arte

A nivel mundial se tiene una representación relevante de países que asumen el compromiso de la eliminación de los PCB. Cabe resaltar que dichos esfuerzos, pese a estar encaminados al mismo propósito, se encuentran en momentos diferentes de acuerdo con la solidez económica y otros aspectos clave de los países. Aquellos con economía en transición se encuentran identificando e inventariando los sistemas cerrados (transformadores), mientras que los llamados “países desarrollados” ya han elaborado el inventario de sus sistemas cerrados y tienen como objetivo los sistemas abiertos como lo son los materiales de construcción como masillas y pinturas de algunas edificaciones, debido a que estas contienen concentraciones importantes de PCB (Whyllie, Paul, Warmuth, Andrea., (2010)).

5.1 Metodologías convencionales para la eliminación de PCB

En la actualidad se están llevando a cabo procesos de investigación alrededor de la eliminación de los PCB, algunos de estos se encuentran en fase productiva y son por ahora la alternativa que tienen los países para cumplir con los compromisos pactados en el SC. Algunos países como: Italia, Francia y Argentina presentan las principales alternativas, como se puede observar en la tabla 1.

Tabla 1.
Métodos convencionales de descontaminación y eliminación de PCB

Proceso	Metodología	Países	Estado actual
Descontaminación	Adición de un líquido refrigerante nuevo (Marconi, Sea. (2017); Tredi (2018))	Francia, Italia	Comercial
	Lavado y rehabilitación de transformadores con tecnología de oxidación con agua supercrítica (Calderón, López, Samper, Montes, & Arias, 2015)	Colombia	Pruebas piloto
	Absorción superficial y afinidad por los hidrocarburos de baja polaridad de las tierras filtrantes del tipo bentonitas (Kioshi (2018))	Argentina	Comercial
Eliminación	Deshalogenación con sodio, litio y derivados. (Marconi, Sea. (2017))	Italia	Comercial
	Deshalogenación con polietilenglicol e hidróxido de potasio (KPEG in batch). (Marconi, Sea. (2017))	Italia	Comercial
	Deshalogenación en circuito cerrado continuo (Marconi, Sea. (2017))	Italia	Comercial
	Tratamientos térmicos de 1200°C, controlados para no liberar vapores tóxicos (Tredi (2018))	Francia	Comercial

5.2 Avances en Colombia

Al igual que muchos otros países donde no se cuenta con la infraestructura para realizar una disposición definitiva de los PCB, Colombia está siguiendo los lineamientos para el inventario, rótulo y exportación del residuo, definidos por la resolución 1741 de 2016 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, que modifica a la resolución 0222 de 2011 del mismo. De igual manera firmó la Resolución 0792 del 17 de mayo de 2013 del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), donde se establecen las matrices de análisis para evaluar su contenido de PCB y se comunica que dichos protocolos serán publicados en un determinado tiempo e indican la dirección web para su consulta (Resolución 0792. (2013)).

A pesar de no contar con la infraestructura indicada para la eliminación adecuada de los PCB, Colombia está adelantando investigaciones muy importantes, es por esto que se ha visto beneficiada con el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo - PNUD quien ha realizado una donación del Global Environment Facility - GEF para implementar un proyecto en el país que le permita desarrollar e impulsar un proyecto el cual lleva por nombre “Desarrollo de la capacidad para la gestión y eliminación ambientalmente adecuada de los PCB”, que incentiva la investigación en pro de la eliminación de los PCB. Este fomenta el desarrollo de plantas piloto para la investigación de nuevas alternativas en la disposición de los PCB (Convocatoria Pública (2016)).

En Colombia a través del marco del Desarrollo de la Capacidad Nacional para la Gestión y Eliminación Ambientalmente Adecuada de PCB, se desarrollaron unas guías que se encuentran divididas por tomos, en donde se aborda esta problemática desde diferentes ángulos. Allí realizan un resumen de las metodologías y las clasifican por su estado de desarrollo. De esta manera como se puede justificar con lo consignado anteriormente, ubica los tratamientos térmicos y reducción química como los que se encuentran en una fase comercial, otros como, oxidación de agua bajo condiciones críticas y de clorinación química afirma se encuentran en pruebas piloto y la biorremediación está en una fase aún más temprana, en pruebas de laboratorio (Calderón, López, Samper, Montes, & Arias, 2015).

De acuerdo con el panorama que tiene Colombia, se presenta la biorremediación como alternativa para degradar aceites contaminados con PCB. Aunque esta metodología se encuentra en fase de laboratorio, se han desarrollado investigaciones en torno a la degradabilidad de dicho contaminante, con microorganismos aerobios, anaerobios y procesos en donde los involucran a ambos, encontrando resultados favorables con rendimientos considerablemente altos (Nabavi, Nikaeen, Amin, & Farrokhzadeh, 2013; Song et al., 2015).

5.3 Biorremediación como alternativa biológica para la eliminación de PCB

Los microorganismos tanto aerobios como anaerobios que están presentes en el proceso de biorremediación, generalmente pertenecen a un grupo de moléculas llamadas surfactantes, ellas tienen un carácter anfipático, es decir, que son hidrofílicas e hidrofóbicas, gracias a esto permite interactuar con moléculas contaminantes en diferentes matrices (De la Rosa, Sánchez, & Ortiz, 2014). Dándose así una serie de procesos metabólicos que se distinguen principalmente por las características particulares del microorganismo involucrado y las variables fisicoquímicas que estén en función de este.

La biodegradación de PCB se realiza a través de numerosos pasos en una cadena metabólica que implica diferentes cepas bacterianas. En este proceso se incluyen dos pasos metabólicos principales:

5.3.1 Decloración reductiva anaeróbica

Proceso de producción de energía en el que los PCB altamente clorados actúan como aceptores de electrones, convirtiéndose en congéneres menos clorados (Field & Sierra-Álvarez, 2008). El sustituyente halógeno se reemplaza por hidrógeno (Quensen, Tiedje, & Boyd, 1988)



Los aceptores de electrones son generalmente los factores que limitan el metabolismo en ambientes anaeróbicos. Por lo tanto, cualquier microorganismo que pueda usar PCB como

aceptor terminal de electrones tendría una ventaja selectiva (Brown Jr. , Bedard, Brennan, Carnahan, Feng, & Wagner, 1987).

Se han aislado varias bacterias anaerobias de dechloración, entre ellas se incluyen *Desulfomonile tiedjei*, *Desulfotobacterium*, *Dehalobacter restrictus*, *Dehalospirillum multivorans*, *Desulfomonas chloroethenica*, *Dehalococcoides ethenogenes* y los anaerobios facultativos *Enterobacter cepa MS-1* y *Enterobacter agglomerans* (Mohn & Tiedje, 1992) *A. xylooxidans* (Murínová, Dercová, and Dudá 2014). Se han reportado mezclas exitosas de cepas de microorganismos que destruyen hidrocarburos y hongos que degradan lignina en el tratamiento de los PCB, (Viisimaa, Karpenko, Novikov, Trapido, & Goi, 2013), estas mezclas varían de acuerdo a la matriz de estudio. Algunos de estos microorganismos dechloran reductivamente el compuesto en una reacción de co-metabolismo; otros utilizan los compuestos clorados como aceptores de electrones en su metabolismo energético.

Es preciso tener en cuenta que las rutas de deshalogenación dependen necesariamente de la naturaleza de los microorganismos que están presentes en el medio y de la estructura del PCB (Song et al. 2015; Murínová, Dercová, and Dudá, 2014).

5.3.2 Degradación aeróbica

Funciona en congéneres con una menor halogenación (menos de 5 átomos de Cloro) mediante una reacción de oxidación, generando 2-hidroxi-6-oxo-6-fenilhexa-2,4-dienoato; ácido clorobenzoico, apertura del anillo y mineralización potencialmente completa (Pieper, 2005).

Los congéneres de PCB resultantes de la dechloración anaeróbica, son el sustrato para las bacterias aeróbicas (Kuipers, Cullen, & Mohn, 1999). La degradación oxidativa aeróbica involucra dos grupos de genes. El primero es responsable de la transformación de congéneres de PCB a ácido clorobenzoico y el segundo grupo es responsable de la degradación de dicho ácido. La obtención del ácido clorobenzoico según (Dercová et al., 2008), puede llegar a ser realmente tóxico y peligroso por lo cual es importante involucrar en este proceso tanto a los microorganismos aerobios como anaerobios para obtener unos subproductos finales menos nocivos. Un sustrato de crecimiento común para bacterias que degradan PCB es bifenilo o

monoclorobifenilo. Entre las bacterias que degradan PCB se encuentran géneros gram negativos como *Pseudomonas*, *Alcaligenes*, *Achromobacter*, *Burkholderia*, *Comamonas*, *Sphingomonas*, *Ralstonia* y *Acinetobacter* y entre géneros Gram-positivos *Rhodococcus*, *Corynebacterium* y *Bacillus* (Furukawa, 2000; Borja, 2005; Pieper, 2005). Algunas de estas bacterias utilizan bifenilo como única fuente de carbono y energía, y cometabolizan los PCB utilizando enzimas metabólicas bifenílicas. (Yun Jia, Xu, Xie, 2008) evidenciaron otros como *Enterobacter* sp. que en presencia de otras fuentes de carbono adicional como lo es el Laureato de sacarosa aumenta entre un 19,9% a 35,5% la capacidad de biodegradación.

Según lo informado por (Wiegel & Wu, 2000), la temperatura y el pH tienen una gran influencia para determinar qué ruta de dechloración microbiana va a tener lugar, ya que dependiendo de estos factores, las cepas bacterianas específicas prevalecen sobre las demás, con su consecuente degradación.

5.3.3 Tratamiento secuencial anaeróbico-aeróbico

La mineralización completa de PCB con alto contenido de cloro solo puede ocurrir bajo tratamiento secuencial anaeróbico-aeróbico (Passatore, Rossetti, Juwarkar, & Massacci, 2014). Los resultados de los estudios realizados usando microorganismos únicamente aeróbicos o anaeróbicos sugieren que la mineralización de compuestos orgánicos clorados se puede lograr a través de la exposición secuencial de cultivos microbianos anaeróbicos y aeróbicos. Según (Nabavi, Nikaeen, Amin, & Farrokhzadeh, 2013) los PCB que tienen un gran número de cloros en su estructura no tienen una buena respuesta de degradación frente a microorganismos aerobios, mientras que los anaerobios permiten una degradabilidad de estas moléculas mucho mayor; a su vez, las moléculas menos sustituidas son degradadas por los microorganismos aerobios.

Se han realizado estudios sobre la transformación de PCB utilizando bacterias anaerobias extraídas de sedimentos contaminados con PCB. En condiciones anaerobias, se ha descubierto que los congéneres de PCB altamente clorados, se deshalogenan reductivamente a través de una eliminación preferencial de las posiciones de Cloro *meta* y *para* que producen congéneres menos

clorados, susceptibles de biodegradación aeróbica. Este patrón de biotransformación parece ser común entre los compuestos aromáticos halogenados (Borja, 2005).

(Nabavi, Nikaeen, Amin, & Farrokhzadeh, 2013) realizaron el primer estudio sobre tratamiento biológico de aceites de transformadores contaminados con PCB en reactores biológicos batch, a través del tratamiento secuencial anaeróbico-aeróbico. Se tuvo una concentración inicial de 200 mg PCB/L para el aceite de transformador de desecho (Askarel) y ambos reactores se inocularon con una mezcla de lodo de aguas residuales y el consorcio microbiano de suelos contaminados con aceite de transformador. Los resultados mostraron una eficiencia promedio de eliminación de DQO en el biorreactor anaerobio de 94.3% y del aerobio de 85.3%, manifestando que los microorganismos son más propensos a metabolizar PCB con alto contenido de cloro, en condiciones anaeróbicas que en condiciones aeróbicas. Para el sistema completo se obtuvo un porcentaje de biodegradación de 94.2% en el proceso anaeróbico y 96.5% en el tratamiento anaeróbico-aeróbico. Este sistema biológico demuestra ser una tecnología adecuada para el tratamiento de aceite de transformador contaminado con PCB, logrando una eficiencia del 99.8% para DQO y 99.9% para eliminación de PCB a altas tasas de carga orgánica, manifestando ser un método rentable y sostenible con el medio ambiente.

Por su parte (Sobiecka, Cedzynska, Bielski, & Antizar-Ladislao, 2009) exploraron la capacidad de 8 mezclas comerciales de microorganismos (Sybron 1000, Biozyn 301, Biozyn 300, DBC 5, ChZR, NS 20-10, NS 20-20, y NS 20) para biodegradar PCB bajo tratamientos aeróbicos, anaeróbicos y anaeróbicos-aeróbicos. El aceite de transformador utilizado contenía el 70% de los congéneres de PCB y se seleccionaron 6 principales (PCB 28, PCB 52, PCB 101, PCB 138, PCB 153 y PCB 168). En general, los resultados evidenciaron biodegradación de congéneres de PCB en todos los tratamientos en los siguientes rangos: 0-99% para anaerobios, 2-97% para aerobios y 40-94% para anaerobios-aerobios. Los resultados de este estudio sugieren que la degradación de compuestos orgánicos clorados podrían lograrse mediante la exposición secuencial a condiciones anaerobias-aerobias; ya que bajo estas condiciones combinadas, todas las mezclas comerciales de microorganismos fueron capaces de metabolizar congéneres de PCB por encima del 40%, mientras que en los tratamientos aerobios y anaerobios individuales sólo algunas mezclas de microorganismos lograron altas tasas de degradación.

En tratamientos anaerobios-aerobios en suelos, se ha evidenciado según (Song et al. 2015) el aumento en la concentración de iones cloruros en la matriz de análisis, hecho que es atribuido a la acción de deshalogenación de las moléculas de PCB por los diferentes microorganismos. El aumento más representativo en la concentración del cloruro se evidencio pasados 24 días de iniciado el experimento y siguió aumentando de una manera menos exponencial, como se pudo determinar en el día 60. Otros autores (Murínová, Dercová, and Dudá, 2014) han encontrado que la concentración de microorganismos es un factor relevante en la degradación de PCB. Estos tienen una fase de crecimiento exponencial donde su tasa de degradación es mínima y cuando alcanzan la fase estacionaria es donde se da el proceso de biodegradación.

Otros estudios se centraron en la heterogeneidad espacial del potencial redox a pequeña escala. Debido a las diferentes condiciones de oxígeno, es posible que los procesos aeróbicos y anaeróbicos tengan lugar simultáneamente en la misma matriz contaminada, dando lugar a una cadena metabólica donde los productos de dechloración anaeróbica se convierten en el sustrato para los pasos de biodegradación aeróbica. De esta forma, se podría lograr una mineralización completa de congéneres de PCB en un sistema de una sola etapa, tal como lo demostró (Tartakovsky et al., 2001) en un biorreactor anaeróbico-aeróbico acoplado, en el que el contacto cercano de microorganismos anaerobios y aerobios dentro de una biopelícula granular, facilitó el intercambio de metabolitos, mejorando así el rendimiento y la estabilidad del sistema.

5.4 Variables dependientes para el proceso de biodegradación

Las tasas de biodegradación en los procesos metabólicos dependen de las características de la contaminación con PCB y se ven afectadas por variables ambientales específicas (Sinkkonen & Paasivirta, 2000) tales como:

- **Concentración de PCB:** En condiciones experimentales, la dechloración más rápida se observó con el uso de concentraciones más altas (800 mg/kg) (Quensen, Tiedje, & Boyd, 1988). A concentraciones inferiores a 50 mg/kg, el proceso se desacelera sustancialmente, debido a la falta de inducción de la enzima degradante y a la imposibilidad de mantener el crecimiento de los organismos competentes. Adicionalmente, las concentraciones de PCB por

encima de 1000 mg/kg pueden causar toxicidad en las comunidades bacterianas (Borja, Taleon, Auresenia, & Gallardo, 2005)

- **Tiempo de la contaminación:** Para el caso de eventos de contaminación en el suelo o matrices de sedimentos, a medida que avanza el tiempo posterior a la contaminación, las moléculas de PCB se vuelven cada vez menos biodisponibles. Por tanto, los PCB recién agregados se degradan más rápido que los preexistentes (Choi, Nfodzo, Lawal, Al-Abed, & Seo, 2012)

- **Estructura del PCB:** Los congéneres no planos (di - tetra - orto sustituidos) son poco degradados. Presuntamente debido al impedimento estérico de la enzima responsable. Los congéneres con cloros localizados en solo uno de los anillos son mucho más fáciles de degradar que aquellos con cloro en ambos anillos (Furukawa, 2000).

- **Cantidad de átomos de Cloro:** La biodegradabilidad disminuye con un mayor número de átomos de cloro en la molécula de PCB (Furukawa, 2000). En un estudio realizado por (Shimura et al. 1996) se sometió una mezcla de congéneres a una radiación con luz ultravioleta, esto dejó una serie de moléculas con una baja sustitución de cloros y posteriormente se sometieron a degradación por *Pseudomonas alcaligenes*, de allí se logró una deshalogenación total en un periodo de una semana.

- **pH y Temperatura:** La influencia de estos factores es compleja debido a las afectaciones a las comunidades bacterianas específicas involucradas, el equilibrio entre la proporción relativa de PCB que se disuelven y los que se absorben en la materia orgánica, afectando la biodisponibilidad del contaminante (Wiegel & Wu, 2000).

- **Poblaciones Microbianas:** La historia microbiana de diferentes áreas juega un papel importante en la velocidad y el alcance de los procesos de biodegradación de PCB. (Vasilyeva & Strijakova, 2007) destacaron la aparición de un período de retraso que va de uno a varios meses antes de que comience la dechloración en los PCB recién enriquecidos. Este tiempo es necesario para activar la microflora bacteriana anaeróbica preexistente que es escasa en los

sitios que no están contaminados con PCB (Wiegel & Wu, 2000). Además, incluso en matrices contaminadas envejecidas, la velocidad y la extensión de la decloración pueden variar según las cepas microbianas existentes y su actividad, dependiendo por ejemplo de las interacciones que se producen entre las bacterias deshalogenantes y no deshalogenantes, por ejemplo en la competencia por sustratos y otros donantes de electrones y aceptores (Wiegel & Wu, 2000).

▪ **Propiedades del suelo y sedimentos:** A medida que aumenta el contenido de carbono orgánico y arcilla, aumenta la adsorción de moléculas de PCB en el suelo o las matrices de sedimentos, por lo que la biodisponibilidad de PCB disminuye (Choi, Nfodzo, Lawal, Al-Abed, & Seo, 2012). La fuerte adsorción puede hacer que los PCB sean más resistentes a la degradación y a la lixiviación de los suelos (Man et al., 2011). Además, la actividad de degradación de microorganismos depende de la eliminación de macro y microelementos, así como de la presencia de carbono orgánico y oxígeno en la matriz contaminada. Según (Song et al. 2015) otros elementos presentes en las principales matrices contaminadas como el hierro, favorecen la biodegradación de los PCB.

Los suelos tienen una gran variedad de características particulares, pero en general se reconoce que la degradación de PCB en esta clase de matrices reduce su efectividad por la carencia de oxígeno (Viisimaa, Karpenko, Novikov, Trapido, & Goi, 2013), para ello (“Effects of Tween-80 on microbial degradation of 2,3',4,4'- tetrachlorinated biphenyl,” 2008) realizaron varios experimentos en donde se evidenció la importancia de una correcta aireación en los suelos que se encuentran en proceso de biorremediación, esto logró que se redujera en un 40 % los PCB respecto a los procesos que no contaban con esa metodología; pese a esto los mismos investigadores plantean la hipótesis de que quizás la reducción del contenido de PCB en el suelo no se deba a la acción de los microorganismos sino que en su lugar está siendo más efectiva la fotólisis que se está induciendo. En otros casos como (Dercová et al., 2008) se evidencia aumento en la concentración de PCB en el suelo tras aplicar la metodología de biorremediación. La hipótesis que plantearon los investigadores se basa en la polaridad de los PCB, estos son moléculas apolares y por tanto hidrofóbicas, los microorganismos funcionan como biosurfactantes y liberan contaminante que por la estructura y composición del suelo pueda tener

secuestrado, por lo cual se encuentra una mayor concentración del contaminante en algunos suelos tratados.

6. Análisis

Conforme con la información presentada como línea base para Colombia, se encuentran varias estrategias para cumplir con una gestión ambientalmente adecuada de los PCB. Inicialmente se destacan las Resoluciones 222 de 2011 y 1741 de 2016, en ellas se establecen los requisitos para la gestión ambiental integral de equipos y desechos que contengan o estén contaminados con PCB. Para ello, Colombia cuenta con una herramienta oficial administrada por el IDEAM, reconocida como Inventario Nacional de PCB, la cual permite conocer el número total de equipos que contienen o han contenido fluidos dieléctricos en estado líquido, estén o no contaminados con PCB y sus desechos. A través de esta herramienta se verifica el avance en el cumplimiento de las metas establecidas, las cuales son:

- ❑ **Meta de marcado:** Los propietarios deben marcar e identificar todos los equipos y desechos. Como mínimo se debe tener marcado el 30% de los equipos al 31 de Diciembre de 2016, el 60% en el 2020 y el total de los equipos al 31 de Diciembre de 2024.
- ❑ **Meta de retiro de uso:** La totalidad de equipos que contengan PCB en concentración igual o mayor a 50 ppm, deben ser retirados de su uso a más tardar el 31 de Diciembre de 2025.
- ❑ **Meta de eliminación:** Los equipos identificados y marcados que contengan o estén contaminados con PCB en una concentración mayor o igual a 50 ppm, deben ser eliminados de una manera ambientalmente segura en los plazos establecidos en el Art 9. de la Resolución 222 de 2011, como sigue:

Tabla 2.

Metas y fechas de cumplimiento para propietarios de equipos contaminados con PCB

Actividad	Meta	Fecha Límite
Marcado e identificación	30% del total del inventario de equipos	31 de Diciembre de 2016
	60% del total del inventario de equipos	31 de Diciembre de 2020
	100% del total de inventario de equipos	31 de Diciembre de 2024
Retiro de uso	100% de equipos contaminados con PCB	31 de Diciembre de 2025
Eliminación ambientalmente adecuada	100% de existencias y desechos contaminados con PCB, identificados y marcados a 2016	31 de Diciembre de 2017
	100% de existencias y desechos contaminados con PCB, identificados y marcados a 2020	31 de Diciembre de 2022
	100% de existencias y desechos contaminados con PCB, identificados y marcados a 2024	31 de Diciembre de 2028

Los propietarios de los equipos, sean personas naturales o jurídicas, públicas o privadas, están en la obligación de:

- Inscribirse al Inventario Nacional de PCB ante la Autoridad Ambiental correspondiente y reportar la totalidad de equipos de su propiedad, actualizando anualmente la información.
- Identificar si los equipos están o no contaminados por medio de un análisis cuantitativo en un laboratorio acreditado. Dicho análisis debe realizarse bajo la metodología establecida por el IDEAM o de acuerdo a la Resolución 222 de 2011, Capítulo II, Art 6, se sugieren otras metodologías como lo son: American Society for Testing and Materials ASTM D4059 y ASTM D6160, Environmental Protection Agency EPA SW-846-Método 8082^a, EPA SW-846-Método 9079, International Electrotechnical Commission IEC 61619 entre otros. Por otro lado dejan como alternativa en el mismo capítulo en el párrafo 3, que fue modificado en el artículo 3 de la Resolución 1741 de 2016, la posibilidad de utilizar otras metodologías que se encuentren validadas pero que se fundamenten en protocolos internacionales. La

técnica analítica que sobresale en estos métodos es la cromatografía de gases con detector de captura de electrones GC-ECD, debido a la sensibilidad de la técnica y a los bajos volúmenes de muestra principalmente. Dentro de la Resolución 222 de 2011 y 1741 de 2016 según corresponda, se describe además una clasificación de los equipos y dependiendo de su fecha y origen indican cómo se deben tratar, por este motivo los equipos deben de inventariarse de manera detallada para evitar exponer a las personas que intervienen en el manejo de estos residuos peligrosos.

- Marcar e identificar sus equipos, para esto se puede usar una nomenclatura propia, pero esta debe ser clara, concisa y acorde con los parámetros solicitados en la Resolución 222 de 2011 en el capítulo II, artículo 8.
- Retirar de uso los equipos contaminados con PCB a más tardar el 31 de Diciembre de 2025.
- Eliminar de manera ambientalmente adecuada los equipos contaminados con PCB, cumpliendo con las metas establecidas.

Adicionalmente la normatividad prohíbe las siguientes actividades: uso de equipos, elementos o sustancias que contengan PCB al año 2025, importación de equipos contaminados, exportación de equipos o desechos contaminados con PCB con fines diferentes a su eliminación ambientalmente adecuada, completar niveles de los equipos que contienen PCB utilizando aceites contaminados y realizar dilución de aceites en concentraciones mayores a 50 ppm de PCB. Varias metodologías planteadas mencionan la dilución como la rehabilitación de los equipos, con esto se prolonga su vida útil y se reduce la generación de residuos eléctricos y peligrosos. Adicionalmente amparados en el Artículo 81 de la Constitución política de Colombia, y en el decreto 4741 de 2005 en el artículo 32, se prohíbe ...”*Importar equipos o sustancias que contengan Bifenilos Policlorados (PCB), en una concentración igual o superior a 50 mg/kg o ppm*”...(Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2005) esta alternativa brinda una oportunidad de no sacar de circulación aquellos equipos con concentraciones inferiores a lo mencionado en la norma. Las restricciones que plantea el Ministerio de Medio Ambiente van encaminadas al cumplimiento de las metas que propende el SC.

De acuerdo con el informe del MADS respecto al estado de cumplimiento de los compromisos establecidos en el Convenio de Estocolmo, para el período de balance del año 2013 con fecha de

corte 31 de Julio de 2015, se encuentra que 533 propietarios a nivel nacional cerraron su reporte del inventario. Estos reportes se realizaron a través de las 40 Autoridades Ambientales (AA) competentes en cada jurisdicción y en todas se cuenta con reportes cerrados (declarados). Los resultados se dividen en: Número de reportes cerrados, Número de reportes transmitidos y por transmitir, Número de elementos cerrados, Número de elementos transmitidos y por transmitir.

Para 9 AA el porcentaje de transmisión del número de reportes y del número de elementos fue del 100% (CARSUCRE, CDA Corporación para el Desarrollo Sostenible del Norte y el Oriente Amazónico, CDMB Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, CORPOCESAR, CORPOCHIVOR, CORPOGUAJIRA, CORPOGUAVIO, CORPOURABA, CORTOLIMA). Para el AMVA el porcentaje de transmisión del número de reportes es del 99,048% y del número de elementos es de 99,996%, lo cual significa que en estas regiones se ha realizado una muy buena gestión para contribuir al Inventario Nacional de PCB.

Para 8 AA el porcentaje de transmisión a esa fecha tanto del número de reportes como del número de elementos fue del 0% (AMB Área Metropolitana de Bucaramanga, CARDIQUE, CODECHOCO, CORALINA, CORMACARENA, CORPAMAG, CSB Corporación Autónoma Regional del Sur de Bolívar y EPA Establecimiento Público Ambiental Cartagena).

Al no encontrarse disponible el 100% de la información en todo el país, la cifras presentes en dicho informe se consideran cifras indicativas del avance en la identificación de existencias de equipos y desechos que contienen o están contaminados con PCB

Para el período de balance del año 2013, en Colombia se reportaron un total de 329.190 equipos, de los cuales 315.392 unidades (95,8%) corresponden a equipos en uso, seguido de 8.213 unidades (2,5%) de equipos en desuso y por último 5.585 unidades (1,7%) de equipos desechados. Adicionalmente, en el año 2013 se reportaron 31,8 toneladas de líquidos desechados contenidos y 43,5 toneladas de otros residuos contaminados con PCB (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2015).

Los equipos reportados se clasificaron en 4 grupos, dependiendo de su concentración y de su carácter confirmado o sospechoso de la presencia de PCB.

Grupo 1: Equipos o desechos con concentración ≥ 100.000 ppm en peso de PCB.

Grupo 2: Equipos o desechos con concentración ≥ 500 ppm en peso de PCB y ≤ 100.000 ppm

Grupo 3: Equipos o desechos con concentración ≥ 50 ppm en peso de PCB ≤ 500 ppm

Grupo 4: Equipos y desechos que contengan <50 ppm en peso de PCB.

De los 315.392 equipos en uso y 8.213 equipos en desuso reportados por las AA, un 95,2% y 55,81% respectivamente, corresponden al grupo 2 sospechoso, con una concentración entre 500-100.000 ppm y dado su carácter sospechoso, los propietarios deberán recurrir a los lineamientos de identificación a través de un análisis cuantitativo en laboratorio acreditado, para caracterizar cada uno de sus equipos.

Como parte de la eliminación ambientalmente adecuada de los equipos contaminados con PCB, Colombia se encuentra exportando este material hacia países como Francia e Italia, en donde se realizan principalmente procesos térmicos y de deshalogenación. Estos procesos químicos, si bien presentan alta eficiencia, son costosos y pueden producir subproductos no deseados como dibenzofuranos policlorados (PCDF) y dibenzodioxinas policloradas (PCDD) debido a una combustión incompleta. La destrucción por métodos físicos principalmente, ha sido la alternativa predilecta por excelencia, pero quizás la que mayores riesgos puede traer consigo, por lo que la mala adecuación de los sistemas de hornos hace que se liberen a la atmósfera sustancias con características mucho más peligrosas para el hombre, aunque con unos sistemas monitoreados constantemente puede brindar una alternativa de rápida aplicabilidad. A su vez, los métodos químicos son apropiados pero tienen limitantes como por ejemplo las instalaciones que requieren y el uso de algunos reactivos, que tienen como objetivo obtener una única reacción para degradar diferentes mezclas. La degradación de los PCB se verá influenciada por las características estructurales, en donde se requieren catalizadores UV específicos para favorecer la producción de compuestos particulares, que tenga un grado de peligrosidad mucho menor que los PCB iniciales.

Siendo consecuentes con la naturaleza de la problemática es necesario partir desde una alternativa que garantice la producción de moléculas sin peligrosidad, para ello se encontraron varias alternativas que implican el uso de microorganismos anaerobios y aerobios. Se evidenció que dependiendo de la caracterización del contaminante, se proponen diferentes asociaciones de microorganismos que alcanzan hasta un 90% de degradación. Ellos utilizan como fuente de energía parte del mismo contaminante y su tasa de crecimiento en condiciones favorables es significativa, lo que lo hace un método basado fundamentalmente en la inserción de los microorganismos.

Es por esto que se presenta la opción de eliminar PCB por medio de microorganismos, dado que estos tienen la capacidad de biodegradar en forma natural dicho compuesto, a través de la producción de enzimas. Esta metodología se lleva a cabo por medio de dos procesos metabólicos principales: Decloración anaeróbica y degradación aeróbica. Sin embargo, se encontró una metodología adicional, que involucra ambas etapas y es el tratamiento secuencial anaeróbico-aeróbico; de acuerdo con los artículos analizados, esta última metodología es la que presenta mayor rendimiento en la degradación, ya que es un proceso sinérgico en el que inicialmente se degrada de forma anaerobia las moléculas altamente cloradas, generando compuestos más simples, que a su vez se convierten en el sustrato para los microorganismos que posteriormente actúan en el proceso aerobio. A través de este tratamiento se lograron las mayores eficiencias de biodegradación con reportes de hasta 99%. Para los procesos individuales se reportaron eficiencias de 85% para aerobios y 94% para anaerobios. Es importante tener en cuenta que esta metodología debe complementarse con el uso de microorganismos de amplio espectro, de manera que se posibilite la degradación de diversos congéneres de PCB. Tras la combinación de microorganismos anaerobios y aerobios se obtiene de forma natural moléculas mucho menos halogenadas, por tanto menos reactivas, mientras que con los procesos que se están llevando a cabo actualmente a nivel industrial se pueden liberar al ambiente sustancias aún más contaminantes.

Estos microorganismos anaerobios y aerobios producen moléculas anfipáticas denominadas biosurfactantes, los cuales presentan una región hidrofílica e hidrofóbica, característica que les facilita reducir las tensiones superficiales e interfaciales y aumentar la solubilidad de compuestos

hidrofóbicos, como los aceites de transformadores. Una de las propiedades más interesantes de este tipo de moléculas es la capacidad que tienen para formar agregados moleculares en solución acuosa. Los monómeros individuales se orientarán con su parte hidrofílica en contacto con la fase acuosa y su porción hidrofóbica hacia el interior del agregado (De la Rosa, Sánchez, & Ortiz, 2014). Esta característica permite que haya mayor afinidad entre el microorganismo y el contaminante, posibilitando en mayor medida la biodegradación.

En los estudios revisados también se encontró que los parámetros influyentes en la biodegradación tienen un punto de convergencia con varias matrices, cambian las proporciones pero la identidad de los analitos es generalmente la misma. La biorremediación no ha sido la técnica más aplicada a nivel industrial, esto es debido a su especificidad y por tanto al gran número de variables que afectan directamente la proliferación de los microorganismos. Sin embargo, se evidenció que un alto porcentaje de las investigaciones, recupera microorganismos de espacios contaminados con PCB y con ellos mismos realizan procesos de degradación del contaminante. Esto quiere decir que la disponibilidad de las cepas es amplia y que los microorganismos son capaces de vivir en ambientes hostiles, por lo cual también se favorece su resistencia.

Para mejorar el rendimiento de los microorganismos y el proceso de biodegradación son relevantes los siguientes parámetros:

- **Concentración de PCB y microorganismos:** Se evidencia en los artículos citados anteriormente la importancia que presenta la concentración tanto del contaminante como de los microorganismos, a mayor oferta de sustrato mayor demanda de microorganismos. De allí se destaca la gran efectividad que tienen las diferentes colonias con altas concentraciones de PCB. Es necesario tener en cuenta que la concentración de PCB no necesariamente es proporcional al número de cloros sustituidos en el anillo. Por lo cual se distingue que la efectividad de la deshalogenación por parte de los microorganismos aumenta cuando la molécula está menos sustituida por cloros, lo que hace que tenga menor impedimento estérico.

- **Presencia de Oxígeno:** Muchos de los microorganismos que se hallaron con la capacidad de degradar PCB tienen un carácter facultativo, otros tantos anaerobios y aerobios. Estos dos últimos pueden coexistir y de esta manera aumentar la efectividad de la reacción reductiva. En los estudios referenciados se destaca cómo los microorganismos anaerobios pueden degradar las moléculas más complejas a especies más simples y estas a su vez pueden ser degradadas por microorganismos aerobios; encontrándose que la combinación de estos dos tipos de procesos permite tasas de degradación superiores al 90% en la mayoría de los casos.
- **Riqueza de nutrientes y otros elementos que favorecen la degradación:** Cuando las matrices son suelo o agua, principalmente, cuentan con una serie de metales, macro y micronutrientes que se disponen naturalmente y favorecen la deshalogenación ya que ayudan a la reducción de los PCB, por su carácter iónico.

Este tratamiento biológico implica especificidad en cuanto a la naturaleza de cada aceite de transformador y al tipo de microorganismos requeridos para inocular el sistema, facilitando su adaptación y crecimiento en el medio. Para garantizar un alto porcentaje de degradación es necesario conocer por medio de la caracterización, el tipo de homólogo, congénere o mezcla de PCB, su concentración, estructura, cantidad de átomos de cloro presente en cada aceite y posteriormente controlar características como el pH, temperatura, presencia de Oxígeno y nutrientes, con el fin de generar equilibrio para las comunidades microbianas involucradas en el proceso.

En los casos analizados se encontró una aplicación positiva de los procesos de biorremediación a escala de laboratorio. Para el caso Colombiano, en el que se pretende realizar una eliminación controlada de los aceites contaminados con PCB (contenidos en los diferentes sistemas cerrados), se puede presentar esta metodología como una alternativa razonable ya que permite controlar variables críticas que afecten a la población de microorganismos, reduciendo o anulando su efectividad en la degradación de PCB.

La legislación ambiental en Colombia es ejemplo para muchos países, ya que se tiene estructurada desde una visión verde, esto se demuestra en la manera como se aborda la problemática de los PCB y las exigencias de una manipulación controlada por personal

capacitado. Aunque no se cuenta con las metodologías y estructuras para desarrollar la eliminación adecuada de estos residuos peligrosos, es claro que solo se exportarán a países que garanticen su correcta disposición. Adicionalmente, se enfatiza que por el territorio nacional no pueden transportarse sustancias peligrosas de otros países, sin importar si es de manera transitoria. Todo lo anterior abre camino a alternativas como la biorremediación, con ésta se propone la degradación de los PCB en puntos estratégicos del territorio, donde se puedan controlar ciertas variables y de esta manera reducir el riesgo en el transporte. Al plantearse esta metodología como una alternativa que se adapta a las características de las mezclas de PCB, se ajusta a necesidades tanto de países que posean tecnologías muy avanzadas como aquellos que no la tienen. La biodegradación es adecuada para el tratamiento de sistemas cerrados, ya que se pueden implementar diversas mezclas de microorganismos de acuerdo a la composición del aceite contaminado. A diferencia de las metodologías físicas, químicas o fisicoquímicas, se han encontrado consorcios de microorganismos anaerobios y aerobios que logran sintetizar a partir de los PCB, moléculas más simples y sin grado de peligrosidad.

Como se ha mencionado antes, definir una metodología en la cual se detalle todo un protocolo dependerá necesariamente de la composición de PCB que contenga el sistema a tratar, por lo cual es necesario realizar pruebas de caracterización de los aceites contaminados en donde se identifiquen los congéneres presentes, como lo sugiere la metodología planteada por el IDEAM (IDEAM, 2012). Con esto se puede seleccionar el mejor consorcio de microorganismos, debido a que como se ha planteado, dependerá del número de sustituyentes de cloro y su posición para evaluar la efectividad de los microorganismos tratantes.

7. Conclusiones

- Colombia cuenta con las herramientas del componente normativo e investigativo para garantizar una gestión ambiental integral de equipos y desechos que se encuentren contaminados con PCB. A la fecha, se está utilizando la plataforma del IDEAM para actualizar el Inventario Nacional por medio de los procesos de identificación y marcado de equipos de cada propietario. Para cumplir con las metas de eliminación ambientalmente adecuada, se investigaron alternativas como la biorremediación, que

pueden aplicarse dentro del territorio nacional a partir de la caracterización de los aceites contaminados, a fin de evitar que se continúen exportando estos residuos hacia Francia e Italia, y disminuir el riesgo ecológico que implica su manipulación y transporte.

- En el proceso de biorremediación de PCB se encontraron tres metodologías principales: dechloración reductiva anaeróbica, la degradación aeróbica y el tratamiento secuencial anaeróbico-aeróbico; estas son técnicas que se han desarrollado para diferentes mezclas de congéneres de PCB y evidencian una alta tasa de efectividad. El sistema biológico más eficiente fue el tratamiento secuencial anaeróbico-aeróbico. En este proceso sinérgico, los PCB altamente clorados se biodegradan más eficientemente bajo condiciones anaerobias, generando congéneres de menor cloración que a su vez se convierten en sustrato para los microorganismos aeróbicos, permitiendo así una mineralización completa del PCB.
- La biorremediación presenta ventajas ecológicas frente a los tratamientos convencionales como la incineración, ya que esta última es costosa y tiene la posibilidad de generar subproductos no deseados y más tóxicos como dibenzofuranos policlorados (PCDF) y dibenzodioxinas policloradas (PCDD), debido a una combustión incompleta. Sin embargo, las tasas de biodegradación dependen de variables específicas como el tipo de microorganismos empleados y su interacción, tiempo de contaminación, concentración y estructura del PCB, cantidad de átomos de Cloro, pH y temperatura. En el caso Colombiano estas variables pueden controlarse con mayor facilidad, por tratarse de sistemas cerrados. Pero debe tenerse en cuenta que respecto a los microorganismos empleados no se puede sugerir un único consorcio que garantice alta eficiencia en todos los sistemas, dado que esto dependerá del tipo de congéneres que estén presentes en cada muestra y que deberá conocerse para cada caso con previa caracterización.
- Se requiere más investigación para comprender mejor las potencialidades y los límites de las biotecnologías ambientales, con el fin de evaluar cuáles son las mejores condiciones que conducen a la optimización de cada tratamiento de remediación de PCB, ya que surgen nuevos conocimientos específicos respecto a la implementación de procesos simultáneos de biodegradación anaeróbica y aeróbica.

8. Referencias bibliográficas

- Ahlborg, U. G., Hanberg, A., & Kenne, K. (1992). Risk assessment of polychlorinated biphenyls (PCBs). *Institute of Environmental Medicine Karolinska Institutet Stockholm, Sweden*. Retrieved from <http://ki.se/sites/default/files/nordpcb-92.pdf>
- Bogdal, C., Niggeler, N., Glüge, J., Diefenbacher, P. S., Wächter, D., & Hungerbühler, K. (2017). Temporal trends of chlorinated paraffins and polychlorinated biphenyls in Swiss soils. *Environmental Pollution*, 220, 891-899. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.10.073>
- Borja, J., Taleon, D. M., Auresenia, J., & Gallardo, S. (2005). Polychlorinated biphenyls and their biodegradation. *Process Biochemistry*, 40(6), 1999–2013. <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2004.08.006>
- Boyle, A., Silvin, C., Hassett, J., Nakas, J., & Tanenbaum, S. (1992). Bacterial PCB biodegradation. *Biodegradation*, 285-298. <https://doi.org/10.1007/BF00129089>
- Brown Jr., J., Bedard, D., Brennan, M., Carnahan, J., Feng, H., & Wagner, R. (1987). Polychlorinated biphenyl dechlorination in aquatic sediments. *General Electric Research and Development Center*. <https://doi.org/10.1126/science.236.4802.709>, 236, 709-712.
- Calderón, J. M. S., López, G. V., Samper, P. V., Montes, F. J. G., & Arias, A. L. (2015). Manual para la Gestión Integral de Bifenilos Policlorados - PCB: Manejo ambientalmente racional de equipos y desechos contaminados con PCB,100.
- Choi, H., Nfodzo, P. A., Lawal, W. A., Al-Abed, S. R., & Seo, Y. (2012). Phenomenological and spectroscopic analysis on the effects of sediment ageing and organic carbon on the fate of a PCB congener spiked to sediment. *Journal of Hazardous Materials*, 239–240, 325–332. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2012.09.001>
- CONAMA, & PNUMA. (2004). Manual de Chile sobre el manejo de bifenilos policlorados (PCB; Askareles): Un estudio de caso sobre la aplicación de guías. Santiago de Chile: Comisión Nacional del Medio Ambiente & Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente.
- Convenio de Estocolmo (2011). Los principales logros de estos 10 años: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-PAWA-SC10-Achievementbooklet.Sp.pdf>
- CNRCOP. (2001). Retrieved Marzo 30, 2018, from Centro Nacional de Referencia sobre Compuestos Orgánicos Persistentes: <http://www.cnrcop.es/gc/informate/convenio-de-estocolmo/>

- CNRCOP. (2010). Retrieved Marzo 30, 2018, from Centro Nacional de Referencia sobre Compuestos Orgánicos Persistentes: <http://www.cnrcop.es/gc/assets/docs/UNEP-POPS-COP-CONVTEXT-FULL.Spanish.pdf>
- CNRCOP. (2014). Recuperado el 26 de Marzo de 2018, de Centro Nacional de Referencia sobre Contaminantes Orgánicos Persistentes. Bifenilos policlorados - PCB: <http://www.cnrcop.es/gc/publicaciones>
- De la Rosa, N., Sánchez, E., & Ortiz, L. (2014). Biosurfactantes y su papel en la biorremediación de suelos contaminados con plaguicidas. *Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental y Algal*, 5(1), 47–67. <https://doi.org/10.7603/s40682-014-0004-8>
- Dercová, K., Čičmanová, J., Lovecká, P., Demnerová, K., Macková, M., Hucko, P., & Kušnir, P. (2008). Isolation and identification of PCB-degrading microorganisms from contaminated sediments. *International Biodeterioration and Biodegradation*. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.01.016>
- Dobbins, D. (1995). *Biodegradation of pollutants*. Encyclopedia of environmental biology, vol 1. Academic Press Inc.
- EPA. (2013). Recuperado el 26 de Marzo de 2018, de U.S Environmental Protection Agency. Aroclor and Other PCB Mixtures. Polychlorinated Biphenyls, basic information: <http://www.epa.gov/epawaste/hazard/tsd/pcbs/aroclor.htm>
- Field, J. A., & Sierra-Alvarez, R. (2008). Microbial transformation and degradation of polychlorinated biphenyls. *Environmental Pollution*, 155(1), 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.10.016>
- Furukawa, K. (2000). Biochemical and genetic bases of microbial degradation of polychlorinated biphenyls (PCBs). *Journal of General and Applied Microbiology*. <https://doi.org/10.2323/jgam.46.283, 46, 283-296>.
- Garzón, J. M., Rodríguez Miranda, J. P., & Hernández Gómez, C. (2017). Aporte de la biorremediación para solucionar problemas de contaminación y su relación con el desarrollo sostenible. *Universidad y Salud*, 19(2), 309. Universidad de Narino. Retrieved from <http://revistas.udenar.edu.co/index.php/usalud/article/view/3120>
- Gestión de PCB. (2014). Retrieved from <https://www.epm.com.co/site/Portals/2/images/Elisa/2GestiónPCBeventoabril42014.pdf>
- Gestión de PCB en Colombia, un compromiso con el medio ambiente - Portal de Clientes Corporativos. (2018). Retrieved October 23, 2018, from <https://www10.epm.com.co/Detalle-Linea-Directa/ArtMID/2348/ArticleID/52/Gesti243n-de-PCB-en-Colombia-un-compromiso-con-el-medio-ambiente>

- Hung, H., Katsoyiannis, A. A., & Guardans, R. (2016). Ten years of global monitoring under the Stockholm Convention on Persistent Organic Pollutants (POPs): Trends, sources and transport modelling. *Environmental Pollution*, 217, 1-3. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.05.035>
- IDEAM. (2012). *Determinación de bifenilos policlorados (PCB) por cromatografía de gases con detector de captura de electrones en superficies sólidas*. (2012). Retrieved from <http://www.nuevaleislacion.com/files/susc/cdj/conc/M2-SAPc-04.pdf>
- IOMC, & UNEP. (1999). Guidelines for the identification of PCBs and materials containing PCBs. Inter Organization Programme for the Sound Management of Chemicals - IOMC & United Nations Environmental Programme - UNEP, Geneva, Switzerland.
- Kioshi (2018). Retrieved Marzo 31, 2018 Tratamiento de aceites (PCB): http://www.kioshi.com.ar/index_tratamiento.php
- Kuipers, B., Cullen, W., & Mohn, W. (1999). Reductive dechlorination of nonachlorobiphenyls and selected octachlorobiphenyls by microbial enrichment cultures. *Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1021/es9900712>, 33, 3579-3585.
- LaGreca, M., Buckingham, P., & Evans, J. (1996). Hazardous waste management. McGraw-Hill, London, United Kingdom.
- Magulova, K. (2012). Stockholm Convention on persistent organic pollutants: triggering, streamlining and catalyzing global scientific exchange. *Atmospheric Pollution Research*, 3(4), 366-368. <https://doi.org/10.5094/APR.2012.041>
- Man, Y. B., Lopez, B. N., Wang, H. S., Leung, A. O. W., Chow, K. L., & Wong, M. H. (2011). Cancer risk assessment of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) and polychlorinated biphenyls (PCBs) in former agricultural soils of Hong Kong. *Journal of Hazardous Materials*, 195, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.08.010>
- Marconi, Sea. (2017). Retrieved Marzo 31, 2018 Soluciones sostenibles para la gestión del ciclo de vida (LCM) de los transformadores eléctricos con aceites aislantes: <https://www.seamarconisolution.com/es/pcb-aceite-y-transformador>
- McEldowney, S., Hardman, D., & Wait, S. (1993). *Pollution: ecology and biotreatment*. New York: Longman Scientific and Technical.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2015). Informe del estado de avance de la identificación de las existencias de equipos y desechos de PCB en el país y estado de cumplimiento de los compromisos adquiridos en el Convenio de Estocolmo sobre las metas de marcado, retiro de uso y eliminación de PCB, 1–171.

- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de Colombia. (2015). Generalidades y conceptos básicos sobre bifenilos policlorados – PCB. Manual para la Gestión Integral de Bifenilos Policlorados - PCB.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.(2005). *Proteger la capa de ozono es proteger la vida*. Retrieved from http://www.minambiente.gov.co/images/AsuntosambientalesySectorialyUrbana/pdf/Políticas_de_la_Dirección/Política_Ambiental_para_la_Gestión_Integral_de_Residuos_o_Desechos_Peligrosos.pdf
- Mohn, W., & Tiedje, J. (1992). Microbial reductive dehalogenation. *Microbiological Reviews*, 56, 482-507.
- Murínová, Slavomíra, Katarína Dercová, and Hana Dudá. 2014. “International Biodeterioration & Biodegradation Degradation of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) by Four Bacterial Isolates Obtained from the PCB-Contaminated Soil and PCB-Contaminated Sediment.” 91:52–59. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2014.03.011>
- Nabavi, B. F., Nikaeen, M., Amin, M. M., & Farrokhzadeh, H. (2013). Biological treatment of polychlorinated biphenyls (PCBs) contaminated transformer oil by anaerobic-aerobic sequencing batch biofilm reactors. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 85, 451–457. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.09.007>
- Passatore, L., Rossetti, S., Juwarkar, A. A., & Massacci, A. (2014). Phytoremediation and bioremediation of polychlorinated biphenyls (PCBs): State of knowledge and research perspectives. *Journal of Hazardous Materials*, 278, 189–202. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.05.051>
- Pieper, D. H. (2005). Aerobic degradation of polychlorinated biphenyls. *Applied Microbiology and Biotechnology*. <https://doi.org/10.1007/s00253-004-1810-4>, 67, 170-191.
- Quensen, J., Tiedje, J., & Boyd, S. (1988). Reductive dechlorination of polychlorinated biphenyls by anaerobic microorganisms from sediments. *Department of Crop and Soil Sciences, Michigan State University, East Lansing, MI 48824, United States*. <https://doi.org/10.1126/science.242.4879.752>, 242, 752-754.
- Resolución 0792. (2013). Retrieved Marzo 30, 2018 IDEAM - Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales: <http://www.ideam.gov.co/documents/51310/56882/Resoluci%C3%B3n+0792+del+17-05-2013+PCB.pdf/6619a3f6-e6b2-4a0e-8ce7-a924bd563fd6>
- Richards, G., & Agranovski, I. E. (2017). Dioxin-like pcb emissions from cement kilns during the use of alternative fuels. *Journal of Hazardous Materials*, 323, 698–709. Elsevier B.V. Retrieved from <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2016.10.040>

- Shimura, Minoru, Takao Koana, Masao Fukuda, and Kazuhide Kimbara. 1996. "Complete Degradation of Polychlorinated Biphenyls by a Combination of Ultraviolet and Biological Treatments." 81(6):573–76. [https://doi.org/10.1016/0922-338X\(96\)81485-1](https://doi.org/10.1016/0922-338X(96)81485-1)
- Sinkkonen, S., & Paasivirta, J. (2000). Degradation half-life times of PCDDs, PCDFs and PCBs for environmental fate modeling. *Chemosphere*, 40(9–11), 943–949. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(99\)00337-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(99)00337-9)
- Sobiecka, E., Cedzynska, K., Bielski, C., & Antizar-Ladislao, B. (2009). Biological treatment of transformer oil using commercial mixtures of microorganisms. *International Biodeterioration and Biodegradation*, 63(3), 328–333. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2008.06.007>
- Song, M., Luo, C., Li, F., Jiang, L., Wang, Y., Zhang, D., & Zhang, G. (2015). Science of the Total Environment Anaerobic degradation of Polychlorinated Biphenyls (PCBs) and Polychlorinated Biphenyls Ethers (PBDEs), and microbial community dynamics of electronic waste-contaminated soil. *Science of the Total Environment*, The, 502, 426–433. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.09.045>
- Scheringer, M., Stempel, S., Hukari, S., Ng, C. A., Blepp, M., & Hungerbuhler, K. (2012). How many persistent organic pollutants should we expect? *Atmospheric Pollution Research*, 3(4), 383-391. <https://doi.org/10.5094/APR.2012.044>
- Stockholm, Convention. (2011). Retrieved Marzo 30, 2018 Protecting human health and the environment from persistent organic pollutants: <http://chm.pops.int/Portals/0/download.aspx?d=UNEP-POPS-PAWA-SC10-Achievementbooklet.Sp.pdf>
- Stockholm, Convention. (2013). Retrieved Marzo 30, 2018 Protecting human health and the environment from persistent organic pollutants: <http://www.pops.int/Countries/StatusofRatifications/PartiesandSignatoires/tabid/4500/Default.aspx>
- Tartakovsky, B., Michotte, A., Cadieux, J. C., Lau, P. C. K., Hawari, J., & Guiot, S. R. (2001). Degradation of Aroclor 1242 in a single-stage coupled anaerobic/aerobic bioreactor. *Water Research*, 35(18), 4323–4330. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(01\)00175-0](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(01)00175-0)
- Tredi (2018). Retrieved Marzo 31, 2018 Soluciones de tratamiento de los PCBs: <http://tredi-tratamiento-pcb.com/soluciones-de-tratamiento/>
- Vasilyeva, G., & Strijakova, E. (2007). Bioremediation of soils and sediments contaminated by polychlorinated biphenyls. *Microbiology*, 639-653. <https://doi.org/10.1134/S002626170706001X>
- Viisimaa, M., Karpenko, O., Novikov, V., Trapido, M., & Goi, A. (2013). Influence of biosurfactant

on combined chemical-biological treatment of PCB-contaminated soil. *Chemical Engineering Journal*. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2013.01.041>

Wiegel, J., & Wu, Q. (2000). Microbial reductive dehalogenation of polychlorinated biphenyls. *FEMS Microbiology Ecology*. [https://doi.org/10.1016/S0168-6496\(00\)00014-3](https://doi.org/10.1016/S0168-6496(00)00014-3), 32, 1-15.

Whyllie, Paul, Warmuth, Andrea., (2010). Inventarios de PCB - El punto de partida, 122.

Yun Jia, L., Xu, L., Xie, J. (2008). Effects of Tween-80 on microbial degradation of 2,3',4,4'-tetrachlorinated biphenyl. (2008). *Journal Of Biotechnology 136S*.